畜禽养殖环境调控与智能养殖装备技术研究进展

杨飞云[1] 曾雅琼[1] 冯泽猛[2] 刘作华[1*] 李保明[3*]

1 重庆市畜牧科学院 农业农村部养猪科学重点实验室，
农业农村部西南设施养殖工程科学观测实验站 重庆 402460
2 中国科学院亚热带农业生态研究所 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室，
畜禽养殖污染控制与资源化技术国家工程实验室 长沙 410125
3 中国农业大学 水利与土木工程学院，农业农村部设施农业工程重点实验室 北京 100083

摘要 养殖环境优化调控和智能养殖技术与装备是现代规模化畜禽养殖的重要技术支撑。影响畜牧业可持续发展的生物安全问题、畜牧环保问题和畜禽产品质量安全问题都与养殖环境控制和养殖装备技术密切相关。文章重点围绕养殖环境智能调控、畜禽健康状态智能辨识和饲养过程智能管理3个技术领域，以热环境、空气质量和光照为主要环境调控因素，分析了养殖环境对畜禽健康的影响以及国内外环境调控的最新技术方法，介绍了以生理、行为、声音和个体自动化实时监测为途径的畜禽健康状态智能辨识技术，以及精准饲喂、机械清粪、畜产品自动收取和养殖信息系统管理等养殖过程智能管理技术与装备的发展现状以及存在的问题。提出了加快畜禽养殖环境调控与智能养殖技术研发与推广应用的相关建议，旨在为我国畜禽养殖业的绿色转型升级和健康可持续发展提供理论依据和技术支撑。

关键词 畜禽养殖，环境调控，智能装备

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.02.005

畜禽产品需求不断增长、小型养殖散户快速退出和劳动力资源日益紧缺等多重压力的叠加，促使我国畜牧业向规模化、集约化和标准化方向绿色转型升级。据统计，目前我国存栏 1 000 头以上的猪场、存栏 100 头以上的牛场和 10 万羽以上的鸡场约 12 800 多个，2017 年畜禽养殖规模化率达到 58% 左右。在规模化养殖中提高养殖环境质量，减少劳动力投入，提高畜禽生产效率，实现高效率、高收益、高环保的合理化、标准化养殖管理，是当前我国畜禽养殖业转型升级面临的一大难题。以移动互联网、物联网、云计

*通讯作者

资助项目：国家重点研发计划（2017YFD0701601、2018YFD0500700、2016YFD0700200、2016YFD0500506），重庆市技术创新与应用示范（社会民生重点）项目（18211），现代农业产业技术体系建设专项（CARS-35）
修改稿收到日期：2019年2月12日

算、大数据和人工智能等为特征的新一代信息技术正在全球范围蓬勃发展，信息化与各行业领域的深度融合是当前全球信息化发展的显著特征。近年来，以数字化信息技术为核心的畜禽智能养殖技术不断深入至畜禽养殖各个环节；环境调控系统、自动饲喂和收采机器人等智能化养殖设备，成为畜禽养殖业提高生产效率、解决劳动力资源短缺和实现健康福利养殖的重要技术抓手。采用人工智能和物联网技术，实现智能化畜牧业生产是我国畜牧业转型升级的重要助力。

本文围绕养殖环境智能调控、畜禽健康智能辨识和智能化饲养管理 3 个领域，以热环境、空气质量和光照为主要环境调控因素，分析了养殖环境对畜禽健康的影响以及国内外环境调控的最新技术，介绍了以生理、行为、声音和个体自动监测为途径的畜禽健康智能辨识技术，以及精准饲喂、机械清粪、畜产品自动收取和养殖信息综合管理等智能化饲养管理技术与装备。在总结现有问题的基础上，提出了相关建议，旨在为我国畜禽养殖业转型升级和健康可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 畜禽养殖环境智能调控技术与装备

养殖环境是影响畜禽健康和生产力的重要因素之一。现代规模化、集约化养殖中畜禽场舍小气候环境的调控，可为畜禽提供适宜的生产环境，这不仅关系到动物本身福利健康，更与畜禽产品质量、动物食品安全和养殖场经济效益息息相关。畜禽舍环境调控主要包括热环境、空气质量及光照调控。

1.1 热环境调控

现代畜禽养殖基本为舍饲饲养，环境温度适宜时，动物健康水平良好，生产性能和饲料利用率都较高，过高或过低的温度会引起动物热应激或冷应激，破坏体热平衡，导致畜禽生产力下降或停止，甚至死亡。艾地云[1]研究发现，在持续高温环境（28℃—35℃）下，体重 15—30 kg、30—60 kg 和 60—90 kg 的试验猪日采食量较常温环境下分别降低 9%、14% 和 20%，日增重分别下降 11%、21% 和 23%，料肉比分别增加 0.05、0.23 和 0.14；当环境温度在 21℃—30℃ 和 32℃—38℃ 范围内，温度每升高 1℃，鸡只采食量分别下降 1.5% 和 4.6%[2]；奶牛在热应激时，食欲减退、呼吸频率增加、直肠温度升高、生产性能下降，直肠温度每升高 1℃，平均日产奶量减少约 1.26 kg/头[3,4]。环境湿度、气流与温度有协同作用，高温时环境湿度增大 10%，相当于环境温度升高 1℃[5]，畜禽舍内气流速率及分布均影响动物机体散热。为缓解畜禽高温热应激，规模养殖场常用的降温方式有湿垫-风机蒸发降温、滴水/喷雾蒸发降温和地板局部降温等。纵向负压通风鸡舍采用湿垫-风机降温系统，在我国南方地区可将鸡舍内最高气温控制在 32℃ 以内，在黄河以北地区可将鸡舍内的最高气温控制在 28℃ 以内[6]。蔡景义等[7]研究发现，封闭式牛舍风机喷淋降温可使舍内 14:00 时的平均温度降低 1.84℃，肉牛呼吸频率降低 4.93次/min。Shi 等[8]研发的利用地下水的猪舍地板局部降温技术，可使高温环境下（34℃）母猪躺卧区温度控制在 22℃—26℃；与 35.8℃ 地板相比，27.6℃ 地板可使母猪日采食量增加 0.86 kg，直肠温度、体表温度和呼吸频率均显著降低（$p<0.01$）[9,10]。Li 等[11]研究发现猪舍进风向下气流比向上气流提高猪体对流散热量 60.4%。

对畜禽舍热环境的调控，畜禽舍建筑外围护结构的保温隔热性能及其气密性是基础，畜禽舍的通风系统优化设计与调控是关键。Wang 等[12]对我国不同气候区的鸡舍建筑围护结构性能与养殖方式（饲养密度）关系等进行了研究，提出了不同气候区屋顶和墙体的热阻要求。Hui 等[13]研究了我国北方地区夏季因湿帘降温纵向通风导致舍内气温骤降产生的温降应激，提出了基于湿球温度的舍内温度调控新方法。王阳等[14]针对西北干旱高昼夜温差地区的湿帘降温和通风系统设计新方法，采用山墙集中排风和纵墙均匀进风的夏

季环境调控新技术，实现了西北干旱地区夏季降温防骤降应激与温度场和气流场的均匀管控。

1.2 空气质量调控

畜禽舍内，由于动物的粪尿、饲料、垫料等产生的粉尘、积存发酵产生的气体，舍内空气质量比较恶劣，易引发以畜禽呼吸道疾病为主的各种疾病。研究发现，猪舍内氨气浓度 35 mg/m³ 时，猪只出现萎缩性鼻炎；氨气浓度 50 mg/m³ 时，猪只增重下降 12%；氨气浓度达 100 mg/m³ 时，猪只增重下降 30%[15,16]。硫化氢浓度为 20 mg/m³ 时，猪只采食量降低且易引发呼吸道疾病；浓度 30 mg/m³ 时，猪只畏光、丧失食欲、表现神经质；浓度达到 76—304 mg/m³时，猪只出现呕吐、失去知觉，最终导致死亡[17]。畜禽舍内粉尘是病毒、细菌、放线菌等有毒、有害成分的主要载体，是引起动物和工作人员呼吸系统问题的主要原因。

规模畜禽舍空气质量调控常采用源头减排、过程控制和末端净化 3 种方式。Liu 等[18]发现采用补充氨基酸减少日粮粗蛋白 2.1%—3.8% 和 4.4%—7.8% 时，养猪生产的源头氨排放分别减少 33.0% 和 57.2%。程龙梅等[19]测试证明了鸡舍传送带干清粪工艺方式较地沟刮板清粪方式可显著改善舍内空气质量。Lim 等[20]采用 254 mm 厚度的生物过滤装置可将育肥猪舍粪沟排出舍外的气体的氨气和硫化氢浓度分别降低 18.0%—45.8% 和 27.9%—42.2%，颗粒物质（PM_{10}）和总悬浮颗粒分别减少 62.9% 和 96.3%。

1.3 光照调控

不同畜禽对光照的敏感度差异较大，尤其是鸡对光的反应十分敏感，其生殖活动与光照密切相关，因此现代鸡舍普遍采用人工控制光照时长与节律。在蛋鸡和种鸡生产中，已普遍采用光照时间和光照强度的调节，以影响和控制鸡的饲料消耗、性成熟、开产日龄、产蛋率和改善蛋品质等[21]；贾良梁等[22]研究发现，光照周期显著影响肉鸡增重和饲料消耗（$p<0.05$），且对肌胃、血液和羽毛相对重影响显著（$p<0.05$），对胸肌相对重影响极显著（$p<0.01$）；Lewis 等[23,24]的研究显示，Ross 种鸡在产蛋期采用 14 h 光照时长，机体性成熟早于 11 h 光照时长，且破蛋率较低；Cobb 肉种鸡产蛋期光照时长 ≤ 14 h 时，随着光照时长增加，开产时间提前，产蛋量增加。

随着近年来对畜禽用 LED 光源的开发与应用，光色对畜禽生产性能的影响以及光环境节能调控的研究也在不断深入。通过 LED 的光色、光照度与光周期等因子的调控，可影响肉鸡小肠黏膜结构来提高营养吸收和促进生长；通过影响卫星细胞增殖及肌肉纤维发育提高屠宰性能与鸡肉品质，同时影响行为和健康，增强免疫力，以及降低死亡率和疾病发生率等[21]，且节能效果显著，每 1 万只蛋鸡每年可节省电费 0.3 万元以上[25]。

1.4 自动化环境调控系统

近年来，以数字化技术为核心的畜禽智能化养殖技术不断深入到畜禽养殖的各个环节。在养殖环境调控方面，将现有的单因素环境调控技术，与现代物联网智能化感知、传输和控制技术相结合，利用先进的网络技术设计而成养殖环境监测与智能化调控系统。系统通过传感器获取畜禽舍内温度、湿度、光照度和有害气体浓度（二氧化碳、氨气、硫化氢等）等环境参数信息，然后经过一定的方式将其传输到系统控制中心；主控器根据采集的环境数据经分析汇总后发出对应的操作命令，并下发给各环境参数控制的终端控制器节点，使其控制相应的现场设备，实现养殖场的环境自动调控。目前国内外已有多种养殖环境自动监控系统和平台，可实现畜禽养殖自动化环境调控[26-28]，克服了传统人工监测控制的滞后、误差大及采用单一环境因素评价舍内复杂环境不准确等弊端，为动物创造一个能发挥其优良生产及繁殖性能的舒适舍内环境。

2 畜禽智能化辨识技术与装备

比利时学者 Berckmans[29]最早提出精准畜牧业的概

念，即连续、直接、实时监测或观察动物状态，使养殖者及时发现和控制与动物健康和福利相关的问题。近年来，畜禽个体识别技术发展迅速，主要表现为利用机器视觉、物联网等先进技术，对动物个体、生理指标和行为活动等进行自动识别，实现智能化饲养管理，为畜禽的养殖管理和健康预警提供技术支撑。

2.1 生理指标识别

家畜体重和体尺是评价动物生长的重要参数，定期检测其变化可有效评估动物的健康和生长状况。传统家畜体重、体尺测量主要靠人工操作，存在工作量大、耗时费力、测量结果不客观、对动物应激大等缺点；由于动物体尺、体重等生长参数之间存在相互关联性，可利用体尺等生长参数预估动物体重[30]。目前国内外采用计算机视觉技术进行畜禽体尺体重测量，构建了单视角点云镜像、基于双目视觉原理和RBF神经网络等测算方法[31-34]，在不影响动物的情况下通过拍摄和计算，评估动物体尺、估算体重，测量结果准确度较高。

畜禽体温和心率数据是判断其健康状况的重要指征，传统的测定方法存在时间长、交叉感染、工作量大、动物应激大等问题，不能适应规模化养殖业的需求。目前，体温、心率的测定主要是基于无线物联网、红外测温、视频成像和心电传感等技术，研发的畜禽体温实时监测采集和心电监测系统，尚处于实验室阶段，难以在生产中准确测量动物体温和心电等数据[35,36]。

2.2 声音识别

畜禽声音识别和定位是研究动物行为、反应动物健康的重要手段之一，对动物声音信号进行特征辨识和定位，能够提高异常行为辨识的准确率，帮助养殖企业及时掌握畜禽健康状况。现有的声源识别和定位技术主要采用麦克风、拾音器等收录设备将动物叫声、饮水声和咳嗽声等声音信息实时录制，并建立声音分析数据库，辨识动物异常发声，对早期疾病进行预警[37,38]。比利时鲁汶大学等研究开发的猪咳嗽声音识别技术已经应用到欧洲的猪场实际生产中，可以自动识别不同原因引起的咳嗽声，并排除非呼吸道疾病引起的咳嗽声从而有效减少抗生素的使用等[39]。

2.3 个体识别

个体识别是畜禽精准养殖管理的重要基础，主要包括图像识别和电子耳牌 2 种技术。图像识别近年来发展较快，如人脸识别技术已经得到广泛应用。但对动物的图像识别技术，如猪脸识别等目前尚处于探索阶段。电子耳标技术在母猪饲养上已有较多应用，但轻便小巧、便于动物佩戴、省电或具有自供电能力又方便获取信号的新型电子耳标尚有待开发。近年来开发应用较多的是采用手持机进行读写的方式，可实现个体的用料、免疫、疾病、死亡、称重、用药、出栏记录等日常信息管理，可追溯性较强。随着射频识别（RFID）电子耳牌的国产化，耳牌价格大大降低，应用范围将不断扩大。

3 智能化饲养技术与装备

畜禽饲养技术与装备不仅决定着畜禽的饲养方式，影响畜禽养殖的环境条件，与畜禽健康和畜产品质量安全直接相关，而且影响生产效率、生产成本和生产效益。欧盟国家自进入 21 世纪以来，在畜禽饲养技术与装备方面陆续研发了新一代的养殖新工艺技术。例如，改母猪定位饲养为群养，结合母猪个体识别技术、智能化精准饲喂技术、发情识别技术和自动分群技术及系列设备的研发与应用，彻底解决了母猪定位饲养的繁殖障碍病，从而使得每头母猪年均提供的断奶仔猪数（PSY）从不到 25 头提高到 30 头以上。通过对畜禽饲养技术与装备的转型升级，欧美国家为畜禽养殖产业的可持续发展奠定了基础。我国目前发展的畜禽养殖现代化技术与装备，主要是参照美国的工业化与集约化养殖模式，在精准饲喂、自动化清粪和畜禽产品自动采收等方面取得一定进展，但研究成

果缺乏系统性。

3.1 精准饲喂

智能化精准饲喂已成为畜禽健康营养供给的重要措施。精准饲喂不仅可解决人工饲喂劳动强度大、工作效率低等问题，而且能满足畜禽不同生长阶段的营养需求，提高畜禽健康水平和生产效率。综合利用机电系统、无线网络技术、Android技术、SQL Lite网络数据等智能化技术手段，研发猪用电子饲喂站和智能化饲喂机等基于信息感知、具有物联网特征的畜禽智能饲喂系统[40-43]（图1），在荷兰、丹麦、德国等欧盟国家可实现畜禽精细化、定时定量、均衡营养饲喂，提高饲喂效率和饲料利用率。我国目前在精准饲喂的日粮配置、不同生理阶段日粮营养需求模型、畜禽养殖环境与个体信息数据的精准采集、畜禽养殖数据库的建立与应用等方面缺少产业化研究开发，影响了饲喂装备技术的智能化开发应用。

3.2 自动清粪

采用自动干清粪工艺方式是畜禽健康生产管理和粪污综合治理的重要前提。自动化清粪主要利用动物行为、机械设备和自动控制等技术，优化设计清粪工艺方式，改水泡粪工艺为机械刮板清粪、传送带清粪或清粪机器人等自动化清粪技术及装备，克服传统人工清粪工作效率低、劳动强度大、工作环境恶劣等问题，可实现畜禽养殖粪便的舍内高效清除和场内自动转运，为改善畜禽舍清洁状况、提高饲养管理效率和推动清洁养殖提供技术支撑。

3.3 畜禽产品自动采收

畜禽产品的自动收集（如挤奶、集蛋等）是现代畜牧业的重要标志之一。机械自动收取不仅能降低劳动强度、节约劳动力成本，且可大幅提高生产效率。基于智能控制系统及配套装置设计研发的自动化挤奶机器人（图2）、捡蛋机器人（图3）、自动集蛋系统等畜禽产品自动或半自动收取系统现已广泛应用于国外规模养殖场，极大地提高了生产效率和产品质量。

4 存在问题

我国畜禽养殖规模化程度不断提高，但畜禽养殖主体仍是中小规模的养殖户，总体机械化水平不高，畜禽养殖的机械化率尚不到1/3，尤其是智能养殖技术与装备尚处于起步阶段。畜禽养殖环境调控、精



图1 母猪电子饲喂站



图2 挤奶机器人



图3 捡蛋机器人

准饲喂、清洁型自动清粪、畜禽健康识别与预警等信息化智能养殖技术方面与发达国家仍存在较大差距，并且成本较高，缺乏具有自主知识产权的智能化技术装备。畜禽养殖环境与设施装备技术对畜禽健康养殖产业支撑不足是影响畜牧业可持续发展问题的关键，因此，提升养殖智能装备技术与解决畜禽生物安全问题、环境污染问题、产品质量问题及饲料资源浪费问题密切相关。我国养殖环境控制及智能养殖设备技术的主要瓶颈有3个。

（1）缺乏畜禽智能养殖创新团队，智能养殖装备技术落后。养殖发达国家正快速推进智能化养殖技术，形成了系列成套的养殖装备，并逐步开始应用智慧畜牧业技术提升畜禽健康、生产水平、生产效率和产品质量。而智能养殖在我国还处于探索阶段，缺乏相应的人才团队、技术和装备支撑，智能养殖主要依托于引进国外技术装备，投入成本高，并且引进的装备技术多为国外20世纪90年代应用的技术（目前这些技术模式已在发达国家淘汰）；同时，由于畜禽养殖的智能化控制软件因其源程序不开放，控制模型不能根据用户当地情况的变化而进行调整或自行改进，难以建立畜禽场自身有效的数据库。此外，我国各地的自然气候条件与技术引进国差异较大，不改造最终也都是难以直接适用。照此下去，预计到2025年欧美发达国家的畜牧业就已经基本实现福利养殖技术的转型升级，我国的畜禽养殖装备技术与发达国家的差距就可能又被拉大到25年以上。

（2）畜禽智能养殖标准化体系缺乏。目前，针对畜禽智能化养殖装备及产品研发的企业及相关产品增加迅速，但同类型的产品毫无规范可言，基本上处于相互模仿阶段，缺乏专业的行业指导。同时，畜禽养殖过程中缺乏智能环境调控、智能辨识、智能饲养的标准化体系，不能实现对采集的信息进行处理，并智能调控相应养殖装备，达到最佳环境、健康水平或者生产性能的目的。

（3）畜牧环境调控与智能化养殖装备科技成果转化滞后。目前国内畜禽智能化养殖装备技术的研究基本还停留在科研试验层面，在智能感知信息技术的数字化、精准化方面跟不上，智能养殖装备技术与针对不同区域、不同养殖模式、不同养殖规模的标准化圈舍设计、养殖工艺参数不配套，导致养殖工艺-设施设备-环境控制技术不匹配，科研成果转化与推广应用力度明显滞后，这就使得先进的养殖理念、养殖方式得不到很好的推广应用。

5 建议

（1）大力加强畜禽智能养殖技术攻关。从畜牧业可持续发展角度看，当前畜牧养殖产业存在的生物安全、环保安全和食品安全问题都与畜禽养殖环境调控与装备技术支撑能力不足有关。在畜禽环境智能调控、健康状态智能辨识、饲养过程智能技术装备研发方面，加强本土化技术攻关，研发具有自主知识产权的智能化福利养殖技术与装备，降低生产成本，缩短与国外技术水平差距。

（2）完善畜禽智能养殖标准化体系。畜禽养殖标准化一直是我国畜牧业发展的方向，也是加快畜牧业生产方式转变、发展现代畜牧业的重要内容之一。应根据畜禽养殖环境控制需求，采用标准化生产管理及控制体系，监控管理畜禽生产过程中热环境、空气质量、光环境等养殖环境，以及动物生理和行为福利的智能监测，以确保动物健康和高效生产，推进人工智能技术与畜禽养殖高度融合。

（3）加快促进畜牧环境调控与智能化养殖装备科技成果转化。从落实《国务院关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见》（国发〔2018〕42号）精神，到2025年畜牧养殖机械化率总体要达到50%左右。这就需要从现在起每年提升2—3个百分点，任务艰巨，支持应用开发类科研院所建设科技成果转化平台，提升共性技术的研究开发和服

务能力；积极扶持高等院校、科研院所、企业联合攻关和科技成果转化，使畜禽智能养殖方面的新技术、新方法、新设备从理论走向实践，从实验研究走向试验示范，为应用于实际生产打好坚实基础。

参考文献

1 艾地云. 常温与高温季节肥育猪主要营养素采食量研究. 中国饲料, 1996, (11): 9-11.

2 张兆顺. 高温季节预防鸡热应激问题研究. 陕西农业科学, 2013, (5): 141-143.

3 徐伟, 赵玉超, 曹露, 等. 北京地区夏季奶牛直肠温度及其对产奶量影响初探. 畜牧兽医学报, 2016, (4): 745-751.

4 崔淘气. 奶牛与热应激. 中国奶牛, 2003, (6): 29-30.

5 汪开英, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 猪舍环境温湿度对育成猪的生理及生产指标的影响. 农业工程学报, 2002, (1): 99-102.

6 张宇. 纵向负压通风鸡舍安装湿帘的效果观察. 当代畜牧, 2001, (1): 29.

7 蔡景义, 冯堂超, 廖阔遥, 等. 封闭型牛舍风机喷淋降温和饲粮添加铬改善肉牛生长性能. 农业工程学报, 2015, (19): 190-194.

8 Shi Z, Li B, Zhang X, et al. Using floor cooling as an approach to improve the thermal environment in the sleeping area in an open pig house. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 359-364.

9 Silva B A N, Oliveira R F M, Donzele J L, et al. Effect of floor cooling on performance of lactating sows during summer. Livestock Science, 2006, 105(1-3): 176-184.

10 Silva B A N, Oliveira R F M, Donzele J L, et al. Effect of floor cooling and dietary amino acids content on performance and behaviour of lactating primiparous sows during summer. Livestock Science, 2009, 120(1-2): 25-34.

11 Li H, Rong L, Zhang G. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 90-100.

12 Wang Y , Zheng W, Shi H , et al. Optimising the design of confined laying hen house insulation requirements in cold climates without using supplementary heat. Biosystems Engineering, 2018, 174: 282-294.

13 Hui X, Li B, Xin H, et al. New control strategy against temperature sudden-drop in the initial stage pf pad cooling process in poultry houses. International Journal of Agricultural & Biological Engineering, 2018, 11(1): 66-73.

14 王阳, 郑炜超, 李绚阳, 等. 西北地区纵墙湿帘山墙排风系统改善夏季蛋鸡舍内热环境. 农业工程学报, 2018, 34(21): 202-207.

15 白红杰, 赵博, 范磊, 等. 4种有害气体对猪群健康状况的影响及其控制技术. 河北农业科学, 2014, (4): 79-83.

16 易中华. 畜禽排泄物污染及其饲料对策. 国外畜牧学（猪与禽）, 1999, (5): 45-46.

17 朱伟, 郑琛, 杨华明, 等. 有害气体对畜禽健康的影响及防控措施研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2018, (11): 79-83.

18 Liu S, Ni J, Radcliffe J S, et al. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation. Bioresource Technology, 2017, 233: 200-208.

19 程龙梅, 吴银宝, 王燕, 等. 清粪方式对蛋鸡舍内空气环境质量及粪便理化性质的影响. 中国家禽, 2015, (18): 22-27.

20 Lim T, Jin Y, Ni J, et al. Field evaluation of biofilters in reducing aerial pollutant emissions from a commercial pig finishing building. Biosystems Engineering, 2012, 112(3): 192-201.

21 沣进明, 王小双, 蒋劲松, 等. 家禽规模养殖LED光环境调控技术进展与趋势分析. 农业机械学报, 2013, 44(9): 231-241.

22 贾良梁, 何闪, Das H, 等. 不同光照周期和饲养密度对肉鸡肥育能力、屠宰性状和部分应激指标的影响. 国外畜牧学（猪与禽）, 2015, (2): 42-47.

23 Lewis P D, Gous R M. Erratum to “effect of final photoperiod and twenty-week body weight on sexual maturity and early egg production in broiler breeders”. Poultry Science, 2006, 85(6): 1121.

24 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Photoperiods for broiler breeder females during the laying period. Poultry Science, 2010, 89(1): 108-114.

25 李福伟, 刘玮, 高金波, 等. LED灯对蛋鸡生产性能的影响及节能效果分析. 山东农业科学, 2017, (11):130-132, 167.

26 Hwang J, Lee J, Lee H, et al. Implementation of wireless sensor networks based pig farm integrated management system in ubiquitous agricultural environments. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.

27 白士宝, 滕光辉, 杜晓冬, 等. 基于LabVIEW平台的蛋鸡舍环境舒适度实时监测系统设计与实现. 农业工程学报, 2017, (15): 237-244.

28 陈熔, 丁凯. 基于无线传感网络的智能畜禽舍环境控制系统设计. 江苏农业科学, 2017, (13): 185-188.

29 Berckmans D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics) , 2014, 33(1): 189-196.

30 Alade N K, Raji A O, Atiku M A. Determination of appropriate model for the estimation of body weight in goats. ARPN Journal of Agricultural and Biological Science, 2008, 3(4): 52-57.

31 李卓, 杜晓冬, 毛涛涛, 等. 基于深度图像的猪体尺检测系统. 农业机械学报, 2016, (3): 311-318.

32 Salau J, Haas J H, Junge W, et al. Feasibility of automated body trait determination using the SR4K time-of-flight camera in cow barns. SpringerPlus, 2014, 3(1): 1-16.

33 刘同海, 李卓, 滕光辉, 等. 基于RBF神经网络的种猪体重预测. 农业机械学报, 2013, (8): 245-249.

34 Jun K, Kim S J, Ji H W. Estimating pig weights from images without constraint on posture and illumination. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 169-176.

35 Youssef A, Viazzi S, Exadaktylos V, et al. Non-contact, motion-tolerant measurements of chicken (*Gallus gallus*) embryo heart rate (HR) using video imaging and signal processing. Biosystems Engineering, 2014, 125: 9-16.

36 Lu M, He J, Chen C, et al. An automatic ear base temperature extraction method for top view piglet thermal image. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 339-347.

37 黎煊, 赵建, 高云, 等. 基于深度信念网络的猪咳嗽声识别. 农业机械学报, 2018, (3): 179-186.

38 Vandermeulen J, Bahr C, Johnston D, et al. Early recognition of bovine respiratory disease in calves using automated continuous monitoring of cough sounds. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 129: 15-26.

39 Ferrari S, Silva M, Guarino M, et al. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs. Computers & Electronics in Agriculture, 2008, 64(2):318-325.

40 熊本海, 杨亮, 曹沛, 等. 哺乳母猪自动饲喂机电控制系统的优化设计及试验. 农业工程学报, 2014, (20): 28-33.

41 乔爱民, 何博侠, 王艳春. 猪用智能粥料器控制系统研究. 农业机械学报, 2016, (7): 166-175.

42 刘金浩, 林都, 鲜浩, 等. 基于ARM一体机的改进生猪智能饲喂系统设计. 中国农机化学报, 2016, (2): 97-100.

43 Janzekovic M, Mursec B, Janzekovic I. Automatic and conventional system for feeding calves. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2011, 49(2): 566-572.

Research Status on Environmental Control Technologies and Intelligent Equipment for Livestock and Poultry Production

YANG Feiyun[1] ZENG Yaqiong[1] FENG Zemeng[2] LIU Zuohua[1*] LI Baoming[3*]

(1 MARA Key Laboratory of Pig Sciences, MARA Scientific Observation Experimental Station for Animal Agricultural Engineering in Southwest of China, Chongqing Academy of Animal Sciences, Chongqing 402460, China;

2 CAS Key Lab of Agroecology Processing Subtropical Region, National Engineering Laboratory for Pollution Control and Waste Utilization in Livestock and Poultry Production, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;

3 MARA Key Lab of Agricultural Engineering in Structure and Environment, College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Environmental control technology, management, and intelligent equipment are critical components for modern intensive livestock and poultry farming, having great impacts on its biosecurity, animal environment, and product quality, which are considered as the mostly important issues for the sustainable development of animal husbandry. Focusing on three important areas of intelligent control of animal housing environment, intelligent identification of livestock and poultry health, and intelligent feeding management, taking thermal environment, air quality, and light environment as main factors in particular, this study technically analyzes the impact of housing environment on animals' health and the state-of-the-art technical methods on environmental manipulation in the world. Also presented in the paper is the current status of intelligent identification technology of livestock and poultry health based on physiological, behavioral, sound, and individual automatic monitoring, the intelligent feeding management and techniques, as well as equipment, including precision feeding, mechanical manure cleaning, auto-collection of animal products, and comprehensive management of animal production information. Based on summary of existing issues and challenges, relevant suggestions on research and development in future are given. The paper aims at providing theoretical basis and technical support on the transformation, upgrading and sustainable development of China's livestock and poultry industry.

Keywords livestock and poultry farming, environmental control, intelligent equipment



杨飞云 重庆市畜牧科学院动物营养研究所所长，农业农村部西南设施养殖工程科学观测实验站站长，养猪科学重庆市市级重点实验室副主任。国务院政府特殊津贴专家，全国农业科研杰出人才及创新团队，重庆市有突出贡献中青年专家。主要从事动物营养需要研究、饲料资源开发利用、畜禽健康养殖关键技术研究和成果推广工作。主持和参加国家科技计划及省部级科研项目30余项。研究成果获国家科技进步奖二等奖1项、省部级科技成果奖励7项，获授权国家专利10余项，发表科研论文70余篇，出版著作5部。E-mail: yfeiyun@yeah.net

YANG Feiyun Director of the Animal Nutrition Institute in Chongqing Academy of Animal Sciences, the Stationmaster of Scientific Observation and Experiment Station of Southwest Facility Aquaculture Engineering, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, and the Deputy Director of Chongqing Key Laboratory of Pig Industry Sciences. Dr. Yang is also an expert enjoyed the special government

*Corresponding author

allowance of the State Council, an outstanding talent of agricultural research in China and leading an innovative team, and a young and middle-aged expert with outstanding contributions in Chongqing. His research programs focus on the animal nutritional requirements, the development and utilization of feed resources, and the key technology of health farming in livestock and poultry. Dr. Yang's scholarly accomplishments include author/co-author of 70 refereed journal articles; 5 published books; 10 authorized invention patents; and PI of over 30 national and provincial projects. He wins one second prize of National Science and Technology Advancement Award and 7 other scientific awards of ministerial and provincial levels. E-mail: yfeiyun@yeah.net



刘作华　重庆市畜牧科学院院长，农业农村部养猪科学重点实验室主任、农业农村部种猪质量监督检验测试中心（重庆）主任。国务院政府特殊津贴享受者、百千万人才工程国家级人选、现代农业产业技术体系岗位科学家、农业农村部科学技术委员会委员。全国先进工作者、全国优秀科技工作者、全国农业科研杰出人才、新中国成立60周年重庆市杰出英模。主要从事猪的营养与饲料科学技术的研究和推广工作，先后主持参加了国家重大科技计划及省部级科研项目50余项；获国家科技进步奖二等奖2项、省部级成果奖17项，获授权专利及版权登记20余项，发表论文150余篇，出版著作10余部。E-mail: liuzuohua66@163.com

LIU Zuohua　President of Chongqing Academy of Animal Sciences, and is currently serving as the Director of the MARA Key Laboratory of Pig Industry Sciences, and the Center of Quality Test and Supervision for Breeding Swine (Chongqing), the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Dr. Liu has been enjoyed the Special government allowances of the State Council, and is a person selected for the 100 Million Talents Project, the post scientist of Modern Agricultural Industrial Technology Systems and the member of the Science and Technology Committee in the Ministry of Agriculture and Rural Affairs. He was rated as national advanced worker, national excellent scientific and technological worker, outstanding talent of agricultural research in China, and one of Chongqing outstanding models at the 60th Anniversary of the Founding of New China. His research programs focus on the research and application of nutrition and feed sciences in pigs. Dr. Liu's scholarly accomplishments include author/co-author of 150 refereed journal articles; over 10 published books; 20 authorized invention patents or copyright registrations; and PI of over 50 national and provincial projects. He wins two second prizes of National Science and Technology Advancement Award and 17 other scientific awards of ministerial and provincial levels. E-mail: liuzuohua66@163.com



李保明　中国农业大学教授，农业农村部设施农业工程重点实验室学科群主任；北京市畜禽健康养殖环境工程技术研究中心主任；中国农业工程学会畜牧工程分会理事长；国际畜禽环境与福利研究中心主任。全国优秀科技工作者；北京市教学名师；全国农业科研杰出人才及创新团队。主要从事设施农业工程新工艺、畜禽福利化养殖与环境控制技术研究。主持完成国家和省部级以上项目30余项；发表研究论文300余篇，出版著作/教材10余部，获授权发明专利30余项。获国家和省部级科技成果奖励10项。Email: libm@cau.edu.cn

LI Baoming　Professor of China Agricultural University, a national excellent scientific and technological worker, as well as an outstanding teacher in Beijing. He is currently serving as the Director of the MARA Key Laboratory Cluster of Facility Agriculture

Engineering, and the Director of Beijing Engineering Research Center on Animal Healthy Environment. Prof. Li is the Co-chair of International Research Center for Animal Environment and Welfare, and the Chair of the Animal Husbandry Section of the Chinese Society of Agricultural Engineering (CSAE). He is an outstanding talent of agricultural research in China, and leading an innovative team in animal housing and environment. His research focuses on new production technology for livestock and poultry, welfare-friendly production systems, and environmental control technology. Prof. Li's scholarly accomplishments include author/co-author of 300 refereed journal articles; over 10 published books; 30 authorized invention patents; and PI of over 30 national and provincial projects. He wins over 10 scientific awards at the national, ministerial and provincial levels. E-mail: libm@cau.edu.cn

■责任编辑：岳凌生

参考文献（双语版）

1 艾地云. 常温与高温季节肥育猪主要营养素采食量研究. 中国饲料, 1996, (11): 9-11.

Ai D Y. Study on main nutrient intake of finishing pigs in normal temperature and high temperature seasons. China Feed, 1996, (11): 9-11. (in Chinese)

2 张兆顺. 高温季节预防鸡热应激问题研究. 陕西农业科学, 2013, 59(5): 141-143.

Zhang Z S. Study on the prevention of heat stress on chickens in high temperature seasons. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2013, 59(5): 141-143. (in Chinese)

3 徐伟, 赵玉超, 曹露, 等. 北京地区夏季奶牛直肠温度及其对产奶量影响初探. 畜牧兽医学报, 2016, 47(4): 745-751.

Xu W, Zhao Y C, Cao L, et al. Study on the effect of dairy cows' rectal temperature on milk yield in summer in Beijing area. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2016, 47(4): 745-751. (in Chinese)

4 崔淘气. 奶牛与热应激. 中国奶牛, 2003, (6): 28-29.

Cui T Q. Dairy cattle and heat stress. China Dairy Cattle, 2003, (6): 28-29. (in Chinese)

5 汪开英, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 猪舍环境温湿度对育成猪的生理及生产指标的影响. 农业工程学报, 2002, 18(1): 99-102.

Wang K Y, Miao X W, Cui S R, et al. Effects of ambient temperature and relative humidity on physiological parameters and performance of growing pigs. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(1): 99-102. (in Chinese)

6 张宇. 纵向负压通风鸡舍安装湿帘的效果观察. 当代畜牧, 2001, (1): 29.

Zhang Y. Influence of installing wet curtain on chicken house with longitudinal negative pressure ventilation. Contemporary Animal Husbandry, 2001, (1): 29. (in Chinese)

7 蔡景义, 冯堂超, 廖阔遥, 等. 封闭型牛舍风机喷淋降温和饲粮添加铬改善肉牛生长性能. 农业工程学报, 2015, 31(19): 190-194.

Cai J Y, Feng T C, Liao K Y, et al. Cooling with fans and spray in closed cowshed and chromium supplementation improving growth performance of beef cattle. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(19): 190-194. (in Chinese)

8 Shi Z, Li B, Zhang X, et al. Using floor cooling as an approach to improve the thermal environment in the sleeping area in an open pig house. Biosystems Engineering, 2006, 93(3): 359-364.

9 Silva B A N, Oliveira R F M, Donzele J L, et al. Effect of floor cooling on performance of lactating sows during summer. Livestock Science, 2006, 105(1-3): 176-184.

10 Silva B A N, Oliveira R F M, Donzele J L, et al. Effect of floor cooling and dietary amino acids content on performance and behaviour of lactating primiparous sows during summer. Livestock Science, 2009, 120(1-2): 25-34.

11 Li H, Rong L, Zhang G. Numerical study on the convective heat transfer of fattening pig in groups in a mechanical ventilated pig house. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 149: 90-100.

12 Wang Y , Zheng W, Shi H , et al. Optimising the design of confined laying hen house insulation requirements in cold climates without using supplementary heat. Biosystems Engineering, 2018, 174: 282-294.

13 Hui X, Li B, Xin H, et al. New control strategy against temperature sudden-drop in the initial stage pf pad cooling process in poultry houses. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 66-73.

14 王阳, 郑炜超, 李绚阳, 等. 西北地区纵墙湿帘山墙排风系统改善夏季蛋鸡舍内热环境. 农业工程学报, 2018, 34(21): 202-207.

Wang Y, Zheng W C, Li X Y, et al. Vertical walls-evaporative

cooling pad and gable-exhaust-air-ventilation system improving poultry house thermal environment in Northwest region of China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 202-207. (in Chinese)

15 白红杰, 赵博, 范磊, 等. 4种有害气体对猪群健康状况的影响及其控制技术. 河北农业科学, 2014, 18(4): 79-83.
Bai H J, Zhao B, Fan L, et al. Effects of four kinds of noxious gas on health of swinery and the control technology. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2014, 18(4): 79-83. (in Chinese)

16 易中华. 畜禽排泄物污染及其饲料对策. 国外畜牧学（猪与禽）, 1999, 19(5): 45-46.
Yi Z H. Livestock and poultry excreta pollution and the feed countermeasures. Animal Science Abroad (Pigs and Poultry), 1999, 19(5): 45-46. (in Chinese)

17 朱伟, 郑琛, 杨华明, 等. 有害气体对畜禽健康的影响及防控措施研究进展. 黑龙江畜牧兽医, 2018, (11): 79-83.
Zhu W, Zheng C, Yang H M, et al. Research progress on the effects of harmful gases on the livestock health and its control measures. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2018, (11): 79-83. (in Chinese)

18 Liu S, Ni J, Radcliffe J S, et al. Mitigation of ammonia emissions from pig production using reduced dietary crude protein with amino acid supplementation. Bioresource Technology, 2017, 233: 200-208.

19 程龙梅, 吴银宝, 王燕, 等. 清粪方式对蛋鸡舍内空气环境质量及粪便理化性质的影响. 中国家禽, 2015, (18): 22-27.
Cheng L M, Wu Y B, Wang Y, et al. Effect of manure cleaning method on air quality in layer house and the physicochemical properties of manure. China Poultry, 2015, 37(18): 22-27. (in Chinese)

20 Lim T, Jin Y, Ni J, et al. Field evaluation of biofilters in reducing aerial pollutant emissions from a commercial pig finishing building. Biosystems Engineering, 2012, 112(3): 192-201.

21 泮进明, 王小双, 蒋劲松, 等. 家禽规模养殖LED光环境调控技术进展与趋势分析. 农业机械学报, 2013, 44(9): 225-235.
Pan J M, Wang X S, Jiang J S, et al. Advancement and trend of LED light environment control technology for intensive poultry production. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(9): 231-241. (in Chinese)

22 贾良梁, 何闪, Das H, 等. 不同光照周期和饲养密度对肉鸡肥育能力、屠宰性状和部分应激指标的影响. 国外畜牧学（猪与禽）, 2015, 35(2): 42-47.
Jia L L, He S, Das H, et al. The effect of different photoperiods and stocking densities on fattening performance, carcass and some stress parameters in broilers. Animal Science Abroad (Pigs and Poultry), 2015, 35(2): 42-47. (in Chinese)

23 Lewis P D, Gous R M. Erratum to “effect of final photoperiod and twenty-week body weight on sexual maturity and early egg production in broiler breeders”. Poultry Science, 2006, 85(6): 1121.

24 Lewis P D, Danisman R, Gous R M. Photoperiods for broiler breeder females during the laying period. Poultry Science, 2010, 89(1): 108-114.

25 李福伟, 刘玮, 高金波, 等. LED灯对蛋鸡生产性能的影响及节能效果分析. 山东农业科学, 2017, 49(11): 124-126.
Li F W, Liu W, Gao J B, et al. Effects of LED light on production performance of laying hens and analysis of energy saving effect. Shandong Agricultural Sciences, 2017, (11): 124-126. (in Chinese)

26 Hwang J, Lee J, Lee H, et al. Implementation of wireless sensor networks based pig farm integrated management system in ubiquitous agricultural environments. Security-Enriched Urban Computing and Smart Grid, 2010.

27 白士宝, 滕光辉, 杜晓冬, 等. 基于LabVIEW平台的蛋鸡舍环境舒适度实时监测系统设计与实现. 农业工程学报, 2017, 33(15): 237-244.

Bai S B, Teng G H, Du X D, et al. Design and implementation on real-time monitoring system of laying hens environmental comfort based on LabVIEW. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(15): 237-244. (in Chinese)

28 陈熔，丁凯. 基于无线传感网络的智能畜禽舍环境控制系统设计. 江苏农业科学, 2017, 45(13): 185-188.
Chen R, Ding K. Intelligent control system design of livestock and poultry house environment based on wireless sensor network. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(13): 185-188. (in Chinese)

29 Berckmans D. Precision livestock farming technologies for welfare management in intensive livestock systems. Revue Scientifique et Technique (International Office of Epizootics) , 2014, 33(1): 189-196.

30 Alade N K, Raji A O, Atiku M A. Determination of appropriate model for the estimation of body weight in goats. Journal of Agricultural and Biological Science, 2008, 3(4): 52-57.

31 李卓，杜晓冬，毛涛涛，等. 基于深度图像的猪体尺检测系统. 农业机械学报, 2016, 47(3): 311-318.
Li Z, Du X D, Mao T T, et al. Pig dimension detection system based on depth image. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 311-318. (in Chinese)

32 Salau J, Haas J H, Junge W, et al. Feasibility of automated body trait determination using the SR4K time-of-flight camera in cow barns. SpringerPlus, 2014, 3: 225.

33 刘同海，李卓，滕光辉，等. 基于RBF神经网络的种猪体重预测. 农业机械学报, 2013, 44(8): 245-249.
Liu T H, Li Z, Teng G H, et al. Prediction of pig weight based on radical basis function neural network. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8): 245-249. (in Chinese)

34 Jun K, Kim S J, Ji H W. Estimating pig weights from images without constraint on posture and illumination. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 153: 169-176.

35 Youssef A, Viazzi S, Exadaktylos V, et al. Non-contact, motion-tolerant measurements of chicken (*Gallus gallus*) embryo heart rate (HR) using video imaging and signal processing. Biosystems Engineering, 2014, 125: 9-16.

36 Lu M, He J, Chen C, et al. An automatic ear base temperature extraction method for top view piglet thermal image. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 155: 339-347.

37 黎煊，赵建，高云，等. 基于深度信念网络的猪咳嗽声识别. 农业机械学报, 2018, 49(3): 179-186.
Li X, Zhao J, Gao Y, et al. Recognition of pig cough sound based on deep belief nets. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 179-186. (in Chinese)

38 Vandermeulen J, Bahr C, Johnston D, et al. Early recognition of bovine respiratory disease in calves using automated continuous monitoring of cough sounds. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 129: 15-26.

39 Ferrari S, Silva M, Guarino M, et al. Cough sound analysis to identify respiratory infection in pigs. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 64(2):318-325.

40 熊本海，杨亮，曹沛，等. 哺乳母猪自动饲喂机电控制系统的优化设计及试验. 农业工程学报, 2014, 30(20): 28-33.
Xiong B H, Yang L, Cao P, et al. Optimal design and test of electromechanical control system of automatic feeder for nursing sow. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 28-33. (in Chinese)

41 乔爱民，何博侠，王艳春. 猪用智能粥料器控制系统研究. 农业机械学报, 2016, 47(7): 166-175.
Qiao A M, He B X, Wang Y C. Control system of smart pig porridge feeder. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 166-175. (in Chinese)

42 刘金浩，林都，鲜浩，等. 基于ARM一体机的改进生猪智能饲喂系统设计. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 97-100.
Liu J H, Lin D, Xian H, et al. Improved design of intelligent

pig-feeding system based on ARM. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 97-100. (in Chinese)

43 Janzekovic M, Mursec B, Janzekovic I. Automatic and conventional system for feeding calves. Journal of Achievements in Materials & Manufacturing Engineering, 2011, 49(2): 566-572.